

LE CERVEAU

Résumé du livre issu de la collection du « MONDE »

« Les défis de la science » (Juillet 2018)

Les études sur le cerveau progressent selon trois grandes voies de recherches :

- La connectomique (atlas des connexions cérébrales),
- La cartographie de l'activité cérébrale,
- La simulation complète du cerveau humain par un ordinateur.

Nous ne sommes qu'au commencement de l'histoire des neurosciences.

Chapitre 1 : A la conquête du cerveau

Le cerveau est un organe complexe et mystérieux qui a toujours résisté aux questionnements des scientifiques.

« Vous, vos souvenirs et vos ambitions, n'êtes rien d'autre que le comportement d'un vaste assemblage de neurones et de molécules ». (Francis CRICK).

L'organe le plus complexe de l'univers

C'est le seul organe humain dont le fonctionnement échappe encore à notre compréhension : 100 000 millions de neurones qui utilisent près de 19 000 des 30 000 gènes qui composent notre génome pour établir...un milliard de connexions par centimètre cube de cortex cérébral !

Chaque neurone est connecté en moyenne à 1000 autres neurones. Tout le système est organisé hiérarchiquement en différents niveaux allant des molécules au niveau cellulaire, puis des réseaux et circuits neuronaux jusqu'au niveau le plus élevé : fonctionnement mental et comportement.

Le cerveau est subdivisé en trois grandes régions :

- L'encéphale,
- Le tronc cérébral,
- Le cervelet.

Voyage au royaume du cerveau

Un monde microscopique complexe. C'est un organe mou, blanchâtre et gélatineux. Les ramifications sont de deux types : les dendrites courtes et épaisses qui bourgeonnent sur le corps neuronal et les axones longs et minces comme des câbles.

Lorsqu'un influx nerveux se propage d'un neurone à un autre, il le fait grâce à la connexion établie entre l'axone du neurone « émetteur » et la dendrite du neurone « récepteur » mais entre les deux se situe un minuscule espace appelé synapse. Cet espace est parcouru par les neurotransmetteurs.

L'anatomie du cerveau. Le cerveau est divisé en 2 hémisphères connecté par un grand câble central : le corps calleux qui permet aux deux hémisphères de communiquer et d'échanger des informations. Chaque hémisphère est divisé en 4 lobes :

- Le lobe occipital,
- Le lobe pariétal,
- Le lobe temporal,
- Le lobe frontal.

L'écorce qui tapisse la surface des lobes représente 80% du volume total. C'est dans le cortex que se trouvent les circuits et réseaux de neurones responsables de nos fonctions mentales les plus sophistiquées. A noter que près de la moitié du cortex cérébral est dédié à la vision.

En dehors du cortex se trouvent d'autres fonctions moins sophistiquées mais non moins vitales :

- Les ganglions basaux,
- Le système limbique chargée de réguler les fonctions non volontaires essentielles : faim, mémoire, émotions et sexualité. Il comprend l'hippocampe (mémoire), l'amygdale (réponses émotionnelles), l'hypothalamus (régulation homéostatique du corps).

Les défis des neurosciences. Ce qui précède ne suffit pas à expliquer pourquoi nous sommes capables de rêver, de nous souvenir, de penser, d'aimer. On en est plutôt « à la fin du début » (Winston CHURCHILL). De nombreux défis restent à relever.

La grande jungle neuronale. Nous savons qu'il existe différents types de neurones. On en a identifié plus de 50 mais les scientifiques estiment qu'il doit en exister des centaines, voire des milliers non encore identifiés. Chaque type se distingue non seulement par sa morphologie mais aussi par son contenu moléculaire. Autre facteur de différenciation des types de neurones : la distance sur laquelle ils projettent leurs connexions. L'unité fonctionnelle du cerveau n'est pas le neurone isolé mais les réseaux complexes. On n'a jamais noté la totalité des connexions pour un neurone de cerveau humain. Donc, la différenciation des types de neurones et de leurs fonctions reste l'un des grands défis des neurosciences.

Le code neuronal : le langage du cerveau. Un autre grand défi est le décryptage du code neuronal, à savoir celui utilisé par les neurones pour communiquer entre eux. Quelles sont la grammaire, la sémantique, la syntaxe ?

La trame de l'activité cérébrale. Elle est très complexe et demeure l'une des grandes énigmes des neurosciences. A ce jour, les chercheurs sont parvenus à identifier plus de 150 aires fonctionnelles.

Le connectome : la carte routière du cerveau. Il s'agit de la carte globale des connexions établies par les neurones. Pour l'instant, les chercheurs ont réussi à cartographier le connectome du ver nématode qui compte 300 neurones et 7000 connexions. Le connectome change au fil du temps : les connexions peuvent se renforcer ou s'effacer en fonction de leur utilisation et certaines régions peuvent prendre en charge les fonctions assumées par d'autres régions. Cela ouvre la voie pour l'expérimentation.

Améliorer nos capacités cognitives : le plus grand défi du futur

Cela nous permet d'espérer de combattre les maladies neurodégénératives. Une bonne partie de ces progrès provient de la recherche en biochimie et en biologie moléculaire.

Comment allumer et éteindre des neurones à volonté. Lorsque l'influx nerveux atteint une terminaison et provoque la libération de neurotransmetteurs, le potentiel d'action déclenché dans le neurone récepteur est la conséquence de l'activation de certaines protéines dites « canaux ioniques ». > Ces canaux sont responsables de la transformation du signal synaptique en un nouveau signal électrique. Aujourd'hui, les chercheurs sont capables de créer des canaux ioniques modifiés grâce à « l'optogénétique ». Cette technique a été mise au point dans les années 2000. La lumière bleue provoque un potentiel d'action, la lumière jaune bloque la transmission de l'influx nerveux. Autrement dit, cette discipline devrait permettre la création d'implants cérébraux qui donnent la possibilité d'activer ou de désactiver des circuits neuronaux.

Des technologies pour interagir avec l'esprit. Les systèmes les plus représentatifs sont les interfaces cerveau-ordinateur, « ICO ». C'est une voie de communication entre le cerveau et un dispositif extérieur (exemple un robot) et un ordinateur. Les recherches sur les ICO datent des années 1970 mais elles commencent à porter leur fruit depuis le début du siècle. Le domaine où les résultats sont le plus spectaculaires est celui des neuroprothèses destinées à restaurer des sens et la motricité. La communication entre le cerveau et la prothèse doit se faire dans les deux sens. En octobre 2016, un patient tétraplégique a pu retrouver des sensations tactiles.

Un chemin lumineux

Les neurobiologistes savent que nous sommes encore très loin de pouvoir déchiffrer les secrets du cerveau mais ils savent aussi que jamais auparavant on n'a disposé d'outils aussi puissants. Il ne fait pas de doute que ces avancées éclaireront d'un jour nouveau notre connaissance de nous-mêmes.

Chapitre 2 : Les succès des neurosciences modernes

Grâce à la technologie, la résolution des observations ne cesse de s'améliorer et l'analyse de milliers de données est facilitée.

L'éveil des neurosciences

Au 19^{ème} siècle, l'idée que les fonctions mentales résidaient dans le cerveau était déjà bien assimilée. Mais, il n'existait pas de consensus sur la grande variété de cellules qui le peuplait. En 1873, une innovation de génie : Camillo GOLGI (médecin italien) a mis au point une méthode de coloration qui a permis d'observer au microscope la structure cellulaire du système nerveux.

Une nouvelle vision des neurones avec la théorie neuronale. L'espagnol Santiago Ramon CAJAL (dessinateur de talent et photographe amateur) fut bouleversé lorsqu'il vit le résultat de la coloration de GOLGI. Il a compris que les neurones étaient des entités individuelles et défendait l'idée que chaque neurone était une cellule distincte. C'est seulement dans les années 1950 que sa théorie a pu être validée grâce au microscope électronique. La théorie de CAJAL a révolutionné notre connaissance du cerveau, ce qui lui vaudra de recevoir en 1906 le prix NOBEL.

Le potentiel d'action: les signaux électriques du cerveau. Au début du 20^{ème} siècle, le développement des microélectrodes et de l'oscilloscope permit l'analyse des signaux neuronaux. Les stimuli sensoriels sont détectés par des récepteurs spécialisés puis transmis au cerveau par les fibres nerveuses de la moelle épinière. Le cerveau répond à son tour par un message. Dans le cerveau des fibres nerveuses relient les aires sensorielles et motrices afin de permettre cette communication à deux voies. Luigi GALVANI fut l'un des premiers (en 1780) à suggérer que les nerfs et les muscles utilisaient l'électricité pour leur fonctionnement. Dans l'électricité ordinaire d'une ampoule, ce sont les électrons, dans le système nerveux, ce sont les ions. Les recherches se sont poursuivies et ont abouti à la caractérisation de la nature ionique du potentiel d'action par les britanniques Alan HODGKIN et Andrew HUXLEY en 1952. On a pu établir que la vitesse de propagation de l'influx nerveux le long des fibres nerveuses était au plus de 27 mètres par seconde (alors que les électrons se déplacent à la vitesse de la lumière).

Le fonctionnement du potentiel d'action. A l'intérieur de la cellule nerveuse, il y a plus d'ions potassium et à l'extérieur ce sont les ions sodium. Il y a une différence de potentiel électrique de l'ordre de - 70 millivolts. L'intérieur de la cellule est chargé négativement. On dit alors que la membrane est polarisée. Les deux chercheurs ont observé que le potentiel de la membrane s'inverse pour devenir positif et que la dépolarisation est suivie par un flux d'ions potassium en sens inverse, de l'intérieur vers l'extérieur du neurone ce qui a pour effet de re-polariser la cellule. Le potentiel d'action se propage à la manière d'une traînée de poudre. Voir P 58 le schéma fonctionnel de la propagation continue du potentiel d'action. Ces deux chercheurs ont reçu un prix NOBEL en 1963. Cependant des questions restaient ouvertes : qu'est-ce qui déclenche l'ouverture initiale des canaux ioniques ?

Les neurotransmetteurs : la connexion chimique

La première démonstration de l'existence des neurotransmetteurs a été fournie par le pharmacologue allemand Otto LOEWI. En 1936, il fut le premier d'une série de savants à recevoir le prix NOBEL pour la découverte de neurotransmetteurs et de leurs mécanismes de signalisation. Nous savons aujourd'hui qu'en règle générale la communication entre neurones ou entre neurones et fibres musculaires est due à l'action chimique des neurotransmetteurs. Une fois libéré, le neurotransmetteur demeure dans la fente synaptique pendant un laps de temps très court (afin de permettre la réception de nouveaux

signaux). Ainsi, d'autres mécanismes provoquent l'élimination par dégradation enzymatique ou, plus fréquemment par recapture et transport à l'intérieur du neurone émetteur.

Pour résumer : au cours des premières décennies du 20^{ème} siècle, la découverte des neurones en tant que cellules individuelles, de leurs signaux électriques et de leur communication chimique a permis d'élucider les bases du fonctionnement du système nerveux.

Des circuits neuronaux aux fonctions complexes du cerveau

L'apparition de nouvelles techniques d'imagerie cérébrale a conduit à des analyses de plus en plus fines.

Les neurones sont connectés entre eux : la découverte des circuits neuronaux. Charles SHERRINGTON (prix Nobel en 1932) avait étudié de près les connections entre les neurones sensoriels de la moelle épinière qui captent l'information provenant de l'extérieur et les neurones moteurs qui transmettent les ordres de mouvement. Le cerveau possède des circuits parallèles et redondants, ce qui confère au système de la robustesse mais complique grandement son étude. On doit à SHERRINGTON l'invention en 1897 le terme « synapse ».

Premières approches pour comprendre le code neuronal. Comment l'information perçue par les organes sensoriels est-elle codée ? Ensuite comment le cerveau interprète-t-il ces impulsions ? En 1928, l'électro-physiologiste Edgar ADRIAN (prix Nobel en 1932) étudia les nerfs responsables de la sensation du toucher. Il découvrit que la variation du potentiel de l'influx nerveux était indépendante de l'intensité du stimulus : le potentiel d'action était une affaire de tout ou rien. Par contre, plus le stimulus était intense, plus la fréquence des décharges d'influx nerveux était élevée. Les travaux de David HUBEL et Torsten WIESEL (prix Nobel 1981) ont mis en évidence la diversité des neurones visuels et leur organisation hiérarchique. Ils ont identifié trois types : cellules simples qui réagissent à des critères de luminosité, cellules complexes qui détectent le bord et les mouvements, cellules hypercomplexes qui réagissent à des angles en déplacement ou à des orientations précises. Donc, nous savons à présent que tous les aspects du comportement impliquent des neurones à des endroits précis qui réagissent de façon spécifique. Mais il est habituel qu'une région du cerveau contienne des circuits impliqués dans différentes fonctions.

Vers une carte dynamique des fonctions cérébrales. Tout ceci permet d'étayer l'idée qu'il existe une cartographie du cerveau. A ce stade, deux écoles s'affrontent : l'holisme qui refuse toute localisation et le localisationnisme qui précise des régions dédiées. L'essor des techniques, notamment l'IRMf (Imagerie cérébrale à Résonance Magnétique Fonctionnelle) ont permis de confirmer que toute activité mentale implique l'activation de circuits dans différents endroits du cerveau.

Le pouvoir du minuscule : l'activité moléculaire. Le neurobiologiste Eric KANDEL s'est distingué dans les années 60 par ses contributions fondamentales à l'étude moléculaire du code neuronal. A l'époque on connaissait la différence entre la mémoire à long terme qui s'accompagne de la production de nouvelles protéines dans les neurones, ce qui n'est pas le cas de la mémoire à court terme. KANDEL découvrit que cette différence provenait des mécanismes moléculaires mis en jeu. L'apprentissage permanent transmet un signal à l'ADN qui synthétise de nouvelles protéines qui servent à créer de nouvelles synapses. Ses découvertes lui ont valu l'obtention d'un prix Nobel en 2000.

Tout ceci démontre la complexité de la compréhension du cerveau. Le but est d'obtenir une carte du cerveau en 3 dimensions : anatomie, connectivité et activité liée au comportement.

Chapitre 3 : un défi : cartographier le cerveau

Isaac ASIMOV, biochimiste et auteur de science-fiction a dit que le cerveau était la structure matérielle la plus complexe que nous connaissions. La révolution des techniques d'observation du cerveau est récente. L'apparition de l'imagerie par résonance magnétique, **IRM**, dans les années 90 a constitué une véritable révolution. Appliquée à l'étude du cerveau, elle est devenue l'**IRMf** : imagerie par résonance magnétique fonctionnelle. L'unité de base de l'image tridimensionnelle en IRMf, le voxe, mesure 2mm³, espace qui comprend plusieurs milliers de neurones et millions de synapses. Il y a donc encore beaucoup à faire mais les avancées sont impressionnantes.

L'exploration du cerveau humain

Les grandes puissances économiques ont lancé une véritable course à la conquête du cerveau :

- En 2009, les Etats-Unis ont inauguré le **Human Connectome Project** avec pour but la carte du connectome humain,
- En 2013, l'administration OBAMA lançait l'initiative **Brain** avec pour objectif de cartographier l'activité cérébrale,
- Toujours en 2013, l'Europe annonçait le **Human Brain Project** qui se propose de simuler le cerveau à l'aide d'une modélisation sur ordinateur.

La connectomique : à la recherche de la carte des connexions neuronales

Les axones des neurones peuvent s'étendre sur de grandes distances. On estime que mis bout à bout, les neurones du cerveau pourraient atteindre 150 000 kms. Le parcours d'un neurone pyramidal laisse parfois : il parcourt l'espace cérébral et se ramifie, établit des synapses avec d'autres neurones....

Les premiers pas du connectome : du vers de terre à la souris. Nous avons vu que BRENNER a établi le connectome complet d'un ver comprenant 300 neurones et 7000 connections synaptiques. Publié en 1986, le résultat a demandé 10 ans de travail ! La technique utilisée ne peut donc convenir à l'étude du connectome humain. L'institut de neuro-informatique et de neuro-imagerie de l'université de Californie du sud a établi une carte des projections neuronales de la souris avec une technique alliant la microscopie optique de pointe à d'autres méthodes spécifiques.

Une première approche du connectome humain. Une des initiatives les plus ambitieuses est le « *Human Connectome Project* ». L'élaboration de la carte se ferait à partir de l'analyse de 1200 sujets. A l'inverse des autres initiatives, l'approche part de l'échelle macroscopique. Les méthodes employées sont à la hauteur des ambitions : Sont utilisées l'IRMf mais surtout L'**IRMd** qui est l'imagerie par résonance magnétique de diffusion. La version la plus avancée de l'IRMd est l'imagerie par tenseur de diffusion l'**ITD** qui réalise des images précises et en couleur des innombrables fibres nerveuses. Pour simplifier le procédé consiste à mesurer la direction de l'eau diffusée le long des fibres nerveuses.

Des techniques de pointe pour surmonter les obstacles. Une des techniques les plus avancée est la microscopie électronique par balayage en série de blocs d'images. L'appareil réalise des sections d'échantillons extrêmement fins. L'œuvre est titanesque et conduit à affirmer que l'élucidation d'un connectome humain complet représente l'un des plus grands défis technologique de tous les temps.

La cartographie de l'activité cérébrale

Pour comprendre le fonctionnement du cerveau, il faut disposer de sa carte complète. L'évolution des techniques utilisées ressemble à celles employées pour le connectome. Le développement de ces techniques est dû en grande partie aux recherches suscitées par l'initiative *Brain*.

Comment écouter l'activité des neurones. L'enregistrement des signaux électriques de neurones individuels et de leurs oscillations est le fondement de l'électroencéphalogramme mis au point en 1929 par le neurologue allemand Hans BERGER. L'inconvénient de cette technique est sa faible résolution spatiale : on sait que le signal provient de la partie superficielle du cerveau sans savoir d'où exactement ni de quel neurone. D'autres approches sont donc nécessaires. Il est nécessaire de comprendre les dynamiques d'activation des neurones.

La révolution de l'imagerie macroscopique. L'apparition au cours des années 90 de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle a révolutionné l'étude du cerveau. La méthode a démontré que tout processus mental active une pluralité de régions du cerveau. La technique d'imagerie calcique révèle comment les neurones se coordonnent pour effectuer une action donnée. On introduit une protéine dans les neurones (la protéine GCaMP) dont la fluorescence varie selon la concentration en ions calcium. Les neurones deviennent donc lumineux lorsqu'ils sont actifs. Cela compense l'impossibilité avec l'IMRf de distinguer l'activité au niveau cellulaire.

Vers l'intégration du connectome et de l'activité cérébrale. Tous ces efforts pour suivre l'activité cérébrale aux échelles micro et macro ne suffisent pas à fournir une image complète. Aujourd'hui, l'état de la technologie facilite une intégration de données issues des différentes approches. C'est l'objectif du projet **MINSCOPE**. C'est peut-être la voie à suivre pour une étude intégrée du cerveau humain. C'est ici qu'entre en jeu un nouvel aspect incontournable des neurosciences.

La simulation du cerveau à grande échelle

Depuis fort longtemps les scientifiques soupçonnent que nos fonctions mentales sont des propriétés émergentes des circuits neuronaux. Pour savoir, il faudrait réaliser une simulation. En cette matière de modélisation l'un des projets les plus ambitieux et le **Human Brain Project**. Une des limites est la capacité de calcul des ordinateurs actuels.

Une autre stratégie consiste à simplifier le modèle. C'est la démarche du projet **Spaun**. Ce modèle de simulation a été créé par Chris ELIASLITH (Directeur du centre de neurosciences de l'université de Waterloo au Canada). Le modèle comprend un cortex frontal et occipital, des ganglions basaux. L'ensemble comprend 2,5 millions de neurones !

Outre ces deux projets, de nombreuses autres initiatives ont fait leur apparition. Elles sont coopératives (échange des informations) et permettront des avancées.

Vers une neuroscience des systèmes

Chacune des voies explorées, connectomique, cartographie, simulation, est une source indispensable mais aucune n'est capable d'expliquer à elle seule la vaste complexité du cerveau humain. Comme nous venons de le voir, les neurosciences contemporaines sont pluridisciplinaires. Les projets de collaboration permettent à la communauté scientifique de partager les données. C'est là que se trouve la clef de compréhension du cerveau.

Chapitre 4 : La révolution neurotechnologique

Les systèmes cerveau-machine permettent de nous aider à dépasser les limites de notre nature. Les **ICO** (interfaces cerveau-ordinateur) sont la pointe de la révolution qui vise non seulement à réparer et restaurer nos capacités mais aussi à aller plus loin dans l'amplification et la redéfinition de notre potentiel humain.

Moduler l'électricité cérébrale

Le cerveau est un organe dont l'activité est basée sur des mécanismes électrochimiques. Traditionnellement, les scientifiques ont tenté de moduler l'activité cérébrale en agissant sur la composante chimique. Cependant, au cours du 20^{ème} siècle, une grande variété de procédés a vu le jour.

La stimulation Trans crânienne. Elle se présente aujourd'hui sous deux formes différentes :

- La stimulation électrique Trans crânienne, **SET**. C'est la plus ancienne et aujourd'hui la plus minoritaire. On pose sur le crâne 2 électrodes de polarité opposées, le courant circule du pôle positif au pôle négatif avec pour effet d'augmenter l'excitabilité des neurones et de faciliter leur décharge autour du pôle négatif. Autour du pôle positif, c'est l'inverse avec un éloignement du seuil de déclenchement du neurone. Cela n'a pas permis de découvrir les mécanismes qui modulent l'activité cérébrale.
- La **SMT**, stimulation magnétique Trans crânienne. Le champ magnétique engendre un courant électrique qui déclenche l'activité des neurones. La SMT a démontré son efficacité dans le traitement de la dépression. Des études cherchent à évaluer son efficacité pour les troubles obsessionnels compulsifs, l'épilepsie, la rééducation post-AVC, la maladie de PARKINSON, les addictions...

Dans les deux cas, les effets peuvent perdurer dans le temps et une répétition des séances provoque des changements durables dus à la plasticité neuronale du cerveau. L'inconvénient de ces techniques est qu'elles ne peuvent être engendrées dans les régions profondes du cerveau.

La stimulation cérébrale profonde. La **SCP** est née au milieu des années 90 au CHU de Grenoble pour corriger les tremblements de malades atteints de la maladie de PARKINSON. Des électrodes ont été placées dans le thalamus moteur. Aujourd'hui utilisée au niveau du noyau sous-thalamique, on constate une amélioration globale de la fonction motrice de 60 à 70%. Cela dit, on ne connaît toujours pas les mécanismes et si l'on souhaite améliorer la précision, il faut avoir recours à d'autres techniques.

L'optogénétique : contrôler les neurones grâce à la lumière

En 1979, le codécouvreur de la structure de l'ADN, Francis CRICK avait prévenu que le principal défi serait de contrôler spécifiquement certains neurones sans affecter l'activité des autres. Mais il a fallu attendre la première décennie de notre siècle pour y parvenir avec la lumière. On utilise un virus pour infecter les neurones souhaités : des ions sodium pour la lumière bleue et des ions chlore pour la lumière jaune. La lumière bleue laisse passer des ions sodium qui dépolarisent le neurone et provoquent un potentiel d'action.

Ainsi, l'optogénétique permet d'activer ou d'inhiber des neurones génétiquement modifiés sensibles à la lumière. Les possibilités de l'optogénétique en matière de manipulation de l'activité cérébrale, de réparation, d'amélioration des capacités sont vastes par le simple usage de la lumière.

Des implants qui connectent notre cerveau à des machines

Le développement des implants pourrait avoir un impact considérable dans le domaine clinique. Ils ont déjà rendu la vue et l'audition à de nombreuses personnes.

Des dispositifs pour retrouver les sens. Un premier type d'implant, l'implant cochléaire, rétablit la capacité auditive : un micro et un microprocesseur placés derrière l'oreille + transmission du signal à une bobine située sous la peau pour convertir les sons en impulsions électriques + transmission à une série d'électrodes implantées dans chacune des cavités de la cochlée + transmission au nerf auditif puis au cerveau. Si le nerf auditif est endommagé, on met des implants dans le tronc cérébral dénommés « oreilles bioniques ». La recherche sur les implants bioniques peut aussi aider ceux qui souffrent de certaines déficiences visuelles.

Restaurer la mobilité. La bionique est l'objet de recherches également par application aux mouvements musculaires. L'exemple le plus connu est le stimulateur cardiaque. Ces dernières années, la **SEF** (stimulation électrique fonctionnelle) a permis des progrès significatifs sur le contrôle volontaire des muscles des bras ou des jambes. On fait aussi entrer en jeu les ICO (interfaces cerveau-ordinateur). Certains pensent que les implants cérébraux deviendront aussi courants que les stimulateurs cardiaques. A noter que les personnes qui souffrent de troubles moteurs doivent souvent faire face à une perte de la sensibilité de leurs membres. Or la sensation de toucher ou de pression jouent un rôle essentiel dans le contrôle du mouvement. Les chercheurs travaillent sur ce point notamment en plaçant des capteurs sur les prothèses.

Interfaces cerveau ordinateur pour communiquer avec l'esprit. C'est un autre secteur en plein développement avec des ICO visant à rétablir la capacité de communication. Des avancées encourageantes ont eu lieu. C'est seulement en 2014 qu'une patiente a réussi à communiquer à l'aide d'une méthode non invasive d'imagerie appelée **fnIR qui est une spectrographie fonctionnelle dans l'infrarouge proche**. On utilise la lumière infrarouge pour détecter à travers le crâne et la peau la consommation d'oxygène du cerveau.

Peu à peu, les ICO conquièrent et domestiquent de plus en plus de domaines fonctionnels du cerveau.

Ce que l'avenir nous réserve

La conquête du cerveau révélera quels sont les engrenages de notre esprit, ses contraintes et ses potentialités. Les résultats qui en découleront ne sont pas sans conséquences sur le plan éthique. Nous disposons d'une solide base de connaissances mais les lacunes sont encore nombreuses.

Nota de DG

Ce livre est très performant sur l'état des connaissances et des techniques. On notera cependant quelques lacunes :

- Aucune allusion à la semaine internationale du cerveau qui apporte chaque année de nombreuses découvertes,
- Omission d'une récente découverte concernant les axones qui comportent eux aussi des « processeurs » biologiques, ce qui a eu pour effet de découvrir un facteur 10 (!!!) de capacité de stockage du cerveau,
- Pas de commentaires sur le fait que le cerveau fait aussi bien du traitement numérique que du traitement analogique,
- Plus important, pas d'informations en épigénétique sur la découverte du Professeur Bruce LIPTON en biologie cellulaire. Elle prouve que le cerveau est un retransmetteur mais que la conscience vient d'ailleurs.

LEXIQUE

- **EEG** : Electroencéphalographie
- **fnIR** : Spectrographie fonctionnelle dans l'infrarouge proche
- **ICO** : Interface cerveau-ordinateur
- **IRMd** : Imagerie par résonance magnétique de diffusion
- **IRMf** : Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle
- **ITD** : Version plus avancée de l'IRMd qui est l'imagerie par tenseur de diffusion
- **SCP** : Stimulation cérébrale profonde
- **SEF** : Stimulation électrique fonctionnelle
- **SET** : Stimulation électrique Trans crânienne
- **SMT** : Stimulation magnétique Trans crânienne